

Erkka Lindstedt

LASERKEILAUS MAARAKENTEIDEN SIIRTymiEN MITTAUKSESSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

Erkka Lindstedt: Laserkeilaus maarakenteiden siirtymien mittauksessa, Laser Scanning in Soil Deformation Measurements
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Joulukuu 2019

Työn tavoitteena on ollut tarkastella laserkeilauksen soveltumista maarakenteiden siirtymien mittauksiin. Työssä on esitelty maarakenteiden tyypillisiä siirtymiä, painumia, sortumia ja roudanousua ja selvitetty niiden mittaamistarvetta ja vaadittavia tarkkuuksia. Lisäksi on tutkittu nykyisiä mittaamenetelmiä, joita maarakenteiden siirtymien mittauksiin on käytössä. Laserkeilausta on tutkittu mittaamenetelmänä, esitelty sen käyttösovelluksia ja niiden tarkkuuksia sekä tutkittu laserkeilausaineiston käsittelyä ja tulkintaa. Laserkeilauksen käytännön soveltumista on tutkittu mittauskokeen avulla, jossa erityishuomiota kiinnitettiin laserkeilauksen käytettävyyteen mittaamenetelmänä ja keilausaineiston luotettavuuteen. Tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuustutkimusta ja koejärjestelyä.

Geoteknisessä suunnittelussa on tyypillisesti suuri määrä epävarmuustekijöitä, mikä lisää rakentamisen aikaisen mittaamisen merkitystä. Usein maarakenteen todellisesta käyttäytymisestä saadaan todellista ja tarkkaa tietoa vasta kun se on rakennettu. Maarakenteiden monitorointi eli jatkuva mittaaminen on yleistynyt viime vuosina merkittävästi, sillä tarkemmalla mittaamisella voidaan varmistua rakenteen turvallisuudesta ja toimivuudesta entistä tehokkaammin. Maarakenteiden vaaditut mittaustarkkuudet vaihtelevat kohteesta riippuen yhdestä senttimetristä kymmeneen senttimetriin.

Laserkeilauksella voidaan määrittää näkyvän ympäristön pintojen sijainti koordinaatistossa ja tätä voidaan hyödyntää maarakenteiden ja niiden siirtymien mittaamisessa. Kohteesta riippuen voidaan käyttää esimerkiksi takymetrin käyttöä vastaavaa maalaserkeilainta tai liikkeestä tehtävää ajoneuvolaserkeilausta. Menetelmien mittaustarkkuus on soveltuvilla menetelmillä alle 5 cm, mutta maamateriaalin pinnan ominaisuudet vaikeuttavat tarkkuuden määrittystä.

Suoritetun mittauskokeen ja kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan todeta, että laserkeilaus soveltuu maarakenteiden siirtymien mittaamiseen ja nykyaikaisella laserkeilauslaitteistolla mittauksen suorittaminen vastaa takymetrimittausta. Laserkeilausaineisto vaatii kuitenkin jälkikäsittelyä ja erityisesti maarakenteiden pintojen määrittämisessä pinnan tulkitseminen voi olla haastavaa. Tällöin maarakenteiden siirtymien määrittäminen ja useiden mittausten välinen luotettavuuden takaaminen vaikeutuu. Kuten myös muilla mittaamenetelmillä, suurin virheen mahdollisuus laserkeilauksessa liittyy käyttäjän virheeseen mutta tässä tapauksessa käyttäjän virheeseen kuuluu myös keilausaineiston tulkinnan aiheuttama virhe. Voidaan todeta, että laserkeilaus soveltuu monessa tapauksessa maarakenteiden siirtymien mittauksiin, mutta monet muut mittaamenetelmät ovat lähes yhtä kattavia, reaaliaikaisempia ja merkittävästi edullisempia toteuttaa. Tulevaisuudessa käsittelysovellusten ja -teknologian kehitys saattaa tehdä laserkeilauksesta erittäin tehokkaan menetelmän myös maarakenteiden siirtymien mittaamiseen.

Avainsanat: Maarakenteet, laserkeilaus, geotekninen monitorointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kiitän tämän kandidaatintyön ohjaajaa Heikki Luomalaa kehittävästä palautteesta ja opastuksesta työhön kuuluvan mittauskokeen suorituksessa. Lisäksi kiitän kaikkia muita työn edistämiseen osallistuneita ja Tampereen yliopiston maa-, pohja- ja ratarakenteiden tutkimusryhmää mahdollisuudesta hyödyntää nykyaikaista laserkeilauslaitteistoa mittauskokeen suorituksessa.

Tampereella, 16.12.2019

Erkka Lindstedt

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO.....	1
2.MAARAKENTEIDEN SIIRTUMIEN MITTAUS.....	3
2.1 Tyypilliset siirtymät.....	3
2.1.1 Painumat.....	3
2.1.2 Sivusiirtymät ja sortumat.....	4
2.1.3 Routanousu	4
2.2 Siirtymien seurantamittaukset eli monitorointi	5
2.3 Tarkkuusvaatimukset.....	6
2.4 Nykyiset siirtymämittausmenetelmät ja -tarkkuudet.....	7
3.LASERKEILAUS MITTAUSMENETELMÄNÄ	10
3.1 Taustaa	10
3.2 Laserkeilaussovellukset.....	11
3.2.1 Maalaserkeilaus	11
3.2.2 Ajoneuvolaserkeilaus.....	11
3.2.3 Lentolaserkeilaus.....	12
3.3 Laserkeilausaineiston tarkkuus, luotettavuus ja käsittely	13
4.LASERKEILAUSKOE	15
4.1 Kokeen tavoitteet.....	15
4.2 Kokeen toteutus.....	15
4.3 Kokeen tulokset	19
4.4 Tulosten yhteenveto	23
5.JOHTOPÄÄTÖKSET	26
LÄHTEET	28

1. JOHDANTO

Painumat, sivusiirtymät ja sortumat ovat maarakenteille tyypillisiä muodonmuutoksia. Maa on rakennusmateriaalina varsin haasteellinen ja sen ominaisuudet saattavat vaihdella merkittävästi, mikä vaikeuttaa maarakenteiden suunnittelua ja mitoittamista. Kun maarakenteiden käyttäytymisestä ei ole täysin varmaa tietoa, korostuu mittauksen ja monitoroinnin merkitys onnistuneen, kestävä ja turvallisen rakenteen toteuttamisessa. Laajojen maarakenteiden, pengerten ja kaivantojen mittaaminen voi kuitenkin olla haastavaa, sillä tarkkailtavat rakenteet saattavat olla pinta-alaltaan hyvinkin suuria ja vaikeasti saavutettavissa. Toisaalta rakenteiden muutokset ja siirtymät ovat usein hyvin pieniä erityisesti verrattuna rakenteiden muuhun mittakaavaan, joten myös vaadittava mittaustarkkuus on siirtymämittauksissa tyypillisesti korkeintaan senttimetrejä. Mittaustekniikan ja -kaluston kehitys pyrkii vastaamaan yhä haastavampien ja laajempien kohteiden mittaus- ja monitorointihaasteisiin.

Laserkeilaus on viime vuosien aikana yleistynyt mittaus- ja kartoitusmenetelmänä syrjäyttäen osin perinteisiä menetelmiä. Rakennetun ympäristön mittaustarpeissa laserkeilausta on käytetty muun muassa maaston korkeuskartoitukseen lentokeilauksella, rakennusten pintojen määrittämiseen korjausrakennuskohteissa, maastomallin luomiseen väylähankkeissa sekä toteumien tallentamiseen ja tarkastamiseen. Laserkeilausmenetelmän etuna on nopeus ja tehokkuus laajojen alueiden mittauksissa verrattuna yksittäisten pisteiden mittaukseen perustuviin menetelmiin. Esimerkiksi pienoiskopterisovellusten kehittyessä ja laitteiston hankintahinnan laskiessa voidaan laserkeilauksen ennustaa kehittyvän yhä tehokkaammaksi mittausmenetelmäksi niin keilausten keston kuin kustannusten kannalta.

Kandidaatintyössä pyritään selvittämään laserkeilauksen soveltumista maarakenteiden siirtymien mittauksiin. Tavoitteena on määrittää maarakenteiden mittaamisen vaatimuksia ja edellytyksiä muun muassa mittaustarkkuuden, -tehokkuuden ja olosuhteiden vaikutuksen osalta. Laserkeilauksen ominaisuuksia verrataan kyseisiin vaatimuksiin ja toisaalta vertaillaan niitä suhteessa muihin käytössä oleviin mittausmenetelmiin. Aiheessa yhdistyy toisaalta laserkeilauksen kehittyminen ja yleistyminen erilaisten rakennuskohdeiden mittaustarpeissa ja toisaalta maarakenteiden mittaamisen ja monitoroinnin kasvava tarve. Laserkeilausta on tutkittu laajalti sen tekniikan ja aineiston teknisen käsittelyn

osalta sekä käyttökohteiden, kuten maastomallien ja toteumatarkastelun osalta. Mittausmenetelmäsovellusta on tutkittu vähäisesti. Maarakenteiden mittausta ja monitorointia on erityisesti viime vuosina tutkittu entistä enemmän, mutta laserkeilaus useimmissa tutkimuksissa jätetty vähemmälle huomiolle. Maarakentamisessa laserkeilausta voidaan käyttää myös esimerkiksi lähtötietojen luomiseen tai toteutuneiden rakenteiden mittamiseen, mutta tässä tutkielmassa tarkastelu rajataan maarakenteiden siirtymien mittauksiin.

Työssä esitellään aihealueen teoriaa, maarakenteiden siirtymiä ja niiden mittaamista, laserkeilauksen ominaisuuksia ja edellytyksiä mittausmenetelmänä sekä suoritetaan mittauskoe, jossa tarkastellaan laserkeilauksen tuottamaa aineistoa luotettavuuden, mitaustarkkuuden ja muiden mittauksen soveltuvuuteen vaikuttavien tekijöiden näkökulmasta. Lopuksi pohditaan laserkeilauksen soveltuvuutta maarakenteiden siirtymien mittaamiseen kirjallisuusselvityksen ja mittauskokeen tulosten perusteella.

2. MAARAKENTEIDEN SIIRTymiEN MITTAUS

2.1 Tyypilliset siirtymät

Maarakenteita ovat maa- ja kiviainesmateriaaleista toteutetut rakenteet, kuten penkeereet, maataytöt, väylien alus- ja rakennekerrokset, maapadot, pohjarakenteet ja muut infrarakentamisen rakenteet. Maarakenteisiin liittyvät olennaisesti myös betoni- ja teräsrakenteet, kuten tukimuurit ja paalut sekä päällysteet ja kalliorakenteet. Maa- ja kiviainesmateriaalit vaihtelevat koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan paljon riippuen esimerkiksi jalostusasteestaan ja käyttökohteestaan ja voidaan todeta, että esimerkiksi luonnonvaraisen moreenin ominaisuudet ovat hyvin erilaiset kuin kallioista murskatulla rakennemateriaalilla.

Maarakennemateriaalien ja pohjamaan maamateriaalien muodonmuutos- ja siirtymäkäyttäytymiseen vaikuttaa monien tekijöiden yhteisvaikutus. Rakenteen jännitystaso, jännityshistoria, tiiviys, ja maa-aineksen rakeisuus sekä rakeiden muoto vaikuttavat sen siirtymien esiintymiseen ja laajuuteen. Siirtymät voidaan jakaa palautuviin ja palautumattomiin, joista erityisesti palautuvat siirtymät aiheutuvat usein ulkoisen dynaamisen kuorman vaikutuksesta. Dynaamiset kuormat syntyvät maarakenteilla tyypillisesti liikennekuorman vaikutuksesta, jolloin tie- tai ratapenkereessä tapahtuu palautuvia siirtymiä. Kuorman suuruus ja kuormituskertojen määrä vaikuttavat osaltaan siirtymien palautumiseen ja suuruuteen. (Pelho 2017, s. 6–7) Seuraavassa esitellään maarakenteiden siirtymätyyppejä ja tekijöitä niiden taustalla.

2.1.1 Painumat

Maarakenteiden painumat aiheuttavat muodonmuutoksia, jotka kohteesta riippuen saattavat vaurioittaa tai jopa tuhota rakenteen. Painumia voivat aiheuttaa esimerkiksi rakenteen stabiiliteetin pettäminen, rakennekerrosten maaraakeiden tiivistyminen tai pohjamaan konsolidoituminen. Maaperän häiriintyminen esimerkiksi paalutustyön yhteydessä voi myös aiheuttaa painumia ympäröivässä maaperässä ja rakenteissa. Painumat voivat olla palautuvia tai palautumattomia ja niiden suuruuteen vaikuttaa muun muassa kuormien suuruus, rasisyyskielten määrä ja tiheys, rakenteen tiivistystyön onnistuminen ja pohjamaan geotekniset ominaisuudet.

Painumien huomioon ottaminen suunnittelussa ja niiden monitorointi rakennusvaiheessa ovat erityisen tärkeää, kun rakennetaan pehmeikköalueelle tai epävarmalle pohjamaalle. Absoluuttisen painuman jatkuvien mittausten avulla saadaan tietoa painumanopeuden

kehityksestä, jonka avulla voidaan määrittää maarakenteiden rakennustyön aloittamisen ajankohta. (Liikennevirasto 2010, s. 13) Erityisen haitallista on rakenteen epätasainen painuminen, mikä aiheuttaa usein vaurioita rakenteelle. Ratarakenteen painumille on annettu (Liikennevirasto 2014, s. 17) alusrakenneluokasta riippuvia kokonaispainuman sekä pituus- ja sivuttaiskaltevuuden muutoksen maksimiarvoja. Painuman raja-arvot vaihtelevat 100–800 millimetrin välillä rakenteen käyttöiän aikana ja kaltevuuden muutoksen raja-arvot 0,1–0,8 prosentin välillä.

2.1.2 Sivusiirtymät ja sortumat

Maarakenteilla voidaan painumien lisäksi havaita sivusiirtymiä tai räjähdymäisesti syntyviä sortumia. Penkereen oman painon aiheuttama sivusiirtymä pengerialueen alapuolella on monessa tapauksessa yhteydessä penkereen päällä tapahtuviin painumiin. Sivusiirtymiä voi olla vaikea havaita pengertä tarkastelemalla, sillä maan siirtymät saattavat jatkautua penkereen liukupinnan mukaisesti hyvin kauas itse penkereestä. Kyseiset siirtymät liittyvät oleellisesti rakenteen vakavuuteen ja siten sen mitoittamiseen.

Sivusiirtymät voivat myös liittyä tukiseinien ja -muurien liikkeisiin. Maanpaineen tukirakenteisiin kohdistamat voimat ovat hyvin suuria, joten jäykissäkin seinärakenteissa ilmenee usein sallittuja siirtymiä, joita tulee monitoroida kaivannon tai käytössä olevan rakenteen turvallisuuden takaamiseksi. Mikäli siirtymien raja-arvot ylittyvät, suoritetaan rakenteen kestävyysnäytteenä otettujen vahvistustoimenpiteiden avulla. Vastaavia maarakenteiden sivusiirtymiä voidaan havaita louhoksilla ja kaivoksilla, jotka saattavat olla erittäin syviä ja ulottua vaihtelevien maakerrosten läpi.

Sortumat ja kallion liikkeet tapahtuvat usein niin räjähdysmäisesti, että niiden mittaaminen tapahtuman aikajaksolla on mahdotonta. Usein sortumia kuitenkin edeltää kehittyviä rakenteen siirtymien vaiheita, joiden mittaamisella ja monitoroinnilla voidaan mahdollinen sortuma ja vahingot havaita etukäteen. Tämä on erityisen kriittistä, jos sortuman voidaan epäillä aiheuttavan vahinkoja ihmisille tai muulle omaisuudelle. Mahdollisen sortuman riittävän aikainen havaitseminen mahdollistaa alueen evakuoinnin ja muut turvatoimenpiteet riittävän ajoissa.

2.1.3 Routanousu

Routiminen on maaperän ilmiö, joka aiheutuu pääasiassa jäälinssien muodostumisesta maanpinnan alapuolella jäätymisvyöhykkeessä. Jäälinssit syntyvät, kun sulasta maasta imeytyy vettä jäätyneelle routarajalle. Routivan maan tilavuus kasvaa jäätyessään, mikä voidaan havaita maan pinnan kohoamisena, routanousuna. Routanousua voi aiheuttaa

myös huokosveden suoran jäätyminen aiheuttama routaturpoama. Tällöin jäälinssiä ei pääse syntymään, mutta routiminen havaitaan silti routanousuna maan pinnalla. Routimista voidaan ehkäistä käyttämällä routimattomia materiaaleja tai pakkasta eristäviä materiaaleja rakenteisiin. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 65) Lisäksi roudan keväisen sulamisen on todettu aiheuttavan erityisesti savi- ja silttikerroksissa konsolidaatiopainumaa. Roudan muodostumisen ja sulamisen mallintaminen on äärimmäisen vaikeaa siihen vaikuttavien muuttujien lukumäärän ja paikallisuuden takia. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 99)

Tien sallittuun routanousuun vaikuttavat esimerkiksi tien vaatimukset, kuten liikennemäärä, ajonopeus ja rakenteen tyyppi, pohjamaan tasalaatuisuus ja tierakenteen vaurioherkkyys. Lähtökohtaisesti tasainen routanousu ei ole haitallista, mutta epätasainen tien pinnan routanousu aiheuttaa ongelmia tien liikennöitävyydelle ja turvallisuudelle. Suunnitteluperusteina käytettävät tierakenteen sallitut laskennalliset routanousut vaihtelevat tiukimman mitoituksen moottoriteiden 30 millimetristä pienien liikennemäärien seutu- ja yhdysteiden 160 millimetriin. (Liikennevirasto 2018, s. 29-30) Routanousun aiheuttamat siirtymät maarakenteissa syntyvät suhteellisen hitaasti ja usein varsin lineaarisesti pakkaskauden aikana.

2.2 Siirtymien seurantamittaukset eli monitorointi

Maarakenteiden geoteknisessä suunnittelussa on useimmiten epävarmuustekijöitä, joista halutaan tarkempaa mittaus- ja monitorointitietoa rakentamisen aikana ja usein myös rakenteen valmistumisen ja käyttöönoton jälkeen. Siirtymien mittaustarve perustuu tilaajan tai rakennuttajan vaatimuksiin ja rakenteiden suunnitelman mukaisien siirtymien toteamiseen tai suunnittelemattomien siirtymien havaitsemiseen. (SGY 2017, s. 33) Suomen rakentamismääräyskokoelman Pohjarakenteiden suunnittelu –ohjeessa (Ympäristöministeriö 2018, s. 7) mainitaan maarakenteiden mittaustarpeesta seuraavasti:

”Rakennuskaivannon aiheuttamien siirtymien ja pohjavedenpinnan muutosten seuranta varten laaditaan seurantamittausohjelma, jonka mukaisesti ympäristön siirtymiä ja pohjavedenpintaa seurataan rakennuskaivantotyön aikana ja tarvittaessa kaivannon valmistuttuakin. – – Mittauksia tehdään riskialueella niin paljon ja sellaisella tarkkuudella, että haitalliset vaikutukset voidaan riittävän ajoissa havaita.”

Seurantasuunnitelmassa esitetään mittaussuureet sekä soveltuvat mittauslaitteistot ja menetelmät, joita halutaan käyttää. Valintaan vaikuttaa mitattavan kohteen olosuhteiden

ja vaadittavan mittaustarkkuuden rajoitteet. (Ympäristöministeriö 2018, s. 7) Maarakenteiden seurannassa seurantamittaussuunnitelmaa voidaan nimittää myös monitorointisuunnitelmaksi. Monitoroitaviin tekijöihin vaikuttavat kohteen suunnitteluratkaisut. Painumamonitorointia tulee tehdä esimerkiksi ylipengerkuormituksen ohjaamiseen ja ratkaisun onnistumisen varmistukseen sekä mahdollisen pengerkevennyksen mitoittamiseen. Tietyissä tapauksissa painumien kehittymisestä voidaan päätellä myös esimerkiksi huokosvedenpaineen asettuminen savikerroksessa. (Liikennevirasto 2011, s. 11) Voidaan myös todeta, että painumamittaukset ovat pohjanvahvistusratkaisusta riippumatta oleellinen keino varmistua kohteen rakennettavuudesta.

Mittauslaitteet tulee asentaa ennen rakennustöitä, jotta voidaan mitata vallitseva tilanne. Maarakenteiden siirtymien riskialueilla mittauksia tehdään niin tiheästi ja sellaisella tarkkuudella, että haitalliset vaikutukset pystytään havaitsemaan riittävän ajoissa. Seurantamittausten merkitys korostuu erityisesti uusia pohjarakennusmenetelmiä käytettäessä, tiiviisti rakennetulla alueella tai jos rakentamisen aikana selviää seikkoja, joita ei ole voitu ottaa huomioon suunnittelussa. (Ympäristöministeriö 2018, s. 8) Vaadittava mittaustaajuus ilmoitetaan seurantasuunnitelmassa ja siihen vaikuttaa mitattavan ilmiön nopeus. Staattisesta kuormasta aiheutuvalle lineaariselle siirtymälle riittää esimerkiksi viikkojen mittausjakso, kun taas dynaamisesta kuormasta, kuten liikennekuormasta aiheutuvat tai räjähdysmäiset siirtymät, kuten sortumat vaativat tiheämpää tai jatkuvaa monitorointia. (SGY 2017, s. 34) Mittaustaajuuden valinta tulee tehdä tapauskohtaiseen tarkasteluun ja suunnitteluun perustuen, sillä myös staattiset kuormat saattavat aiheuttaa räjähdysmäisiä siirtymiä esimerkiksi jännitteisissä kalliorakenteissa.

Maarakenteiden siirtymien mittaus ja valvonta liittyy myös rakenteiden kelpoisuuden, kestävyys ja turvallisuuden toteamiseen. Yksittäisistä rakentamisen työnsuorituksista pidetään yksityiskohtaista suorituspöytäkirjaa, jossa esitetään mittaus- ja havaintotulokset. Suorituspöytäkirjoja pidetään erityisesti kaivantorakenteista, kuten tukiseinistä ja ankkuroinneista, pohjanvahvistuksista sekä maarakenteiden materiaalien ominaisuuksista, laadusta ja tiiviystarkkailusta. Mittaukset ja muut havainnot yhdessä muodostavat perusteet rakenteen laadunvalvonnalle. (Ympäristöministeriö 2018, s. 8, 20)

2.3 Tarkkuusvaatimukset

Mittaustoimenpiteissä on aina mukana virheitä, jotka aiheutuvat mittaajan ja mittausmenetelmien virheistä sekä ympäristön ja olosuhteiden vaikutuksesta. Mittauslaitteiston ja tiedonsiirtomenetelmän toimintavarmuus ja mahdolliset häiriöt tulee ottaa huomioon mittauksen ja monitoroinnin suunnittelussa ja toteutuksessa. (SGY 2017, s. 30) Maarakenteiden

teiden siirtymien mittaamisen tarkkuusvaatimuksiin vaikuttavat rakenteiden suunnittelu-
perusteet. Tilaajat, kuten Väylä ovat antaneet vaatimuksia erilaisille rakenteille muun
muassa käyttökohteesta riippuen. Lisäksi rakenteiden mitoitusmenettelystä on erilaisia
ohjeita, jotka ohjaavat suunnittelua. Suorista painumamittauksista voidaan yleisesti to-
deta, että mittaustarkkuuden tulisi olla noin 10 millimetrin luokkaa, jotta mittaustulosten
perusteella voidaan todeta rakenteen painumien olevan raja-arvojen sisäpuolella. Sivut-
taiskaltevuuden muutoksen mittauksessa mitattaviin suureisiin vaikuttaa rakenteen le-
veys. (Tiehallinto 2008)

Sekä painumien, sivusiirtymien, että routanousun mittaamisessa periaatteena voidaan
pitää, että tarkemman mittaustuloksen avulla saadaan tarkempia ja luotettavampia tu-
loksia. Täten myös havaintojen analysointi, maarakenteiden siirtymien mallintaminen ja
mahdolliset korjaustoimenpiteet voidaan määrittellä tarkemmin. Tarkkuusvaatimuksia ei
voida kuitenkaan pitää yksiselitteisenä asiana, vaan tulee ottaa huomioon myös mittaus-
ten tehokkuus ja kustannukset, jotta tarpeenmukainen monitorointi voidaan toteuttaa.

2.4 Nykyiset siirtymämittausmenetelmät ja -tarkkuudet

Siirtymämittausmenetelmät voidaan jakaa geodeettisiin menetelmiin, jotka mittaavat siir-
tymiä maan pinnalta, sekä geoteknisiin menetelmiin, joiden avulla voidaan mitata maan
sisäisiä siirtymiä ja muita parametreja. Siirtymien mittaukseen käytettäviä menetelmiä ja
niiden tarkkuusominaisuuksia on esitelty seuraavassa kappaleessa. Menetelmien tar-
kempia ominaisuuksia ja monitoroinnin automatisointia on käsitelty laajemmin SGY:n
(2017) monitorointiohjeessa.

Geodeettisia mittausmenetelmiä ovat esimerkiksi takymetrimittaus ja tarkkavaaitus. Ra-
kenteen pinnan painumaa voidaan seurata asentamalla pinnalle mittausnasta, jonka si-
jainti xyz-koordinaatistossa voidaan määrittää takymetrimittauksella. Nastan pysyminen
paikallaan tulee varmistaa, mikä on esimerkiksi karkearakeisessa maamateriaalissa
haastavaa. Osaltaan virhemahdollisuus on myös takymetrin asemoinnissa. Takymetri-
mittauksen mittaustarkkuus on 2–10 mm. (Liikennevirasto 2011, s. 10) Tarkkavaaituk-
sessa määritetään kahden maanpinnan pisteen korkeusero vaaituskojeella. Vaaitus vaa-
tii vaakasuoran tähtäyksen mittaushetkellä. Tarkkavaaituksen mittaustarkkuus on 0,4–
5 mm.

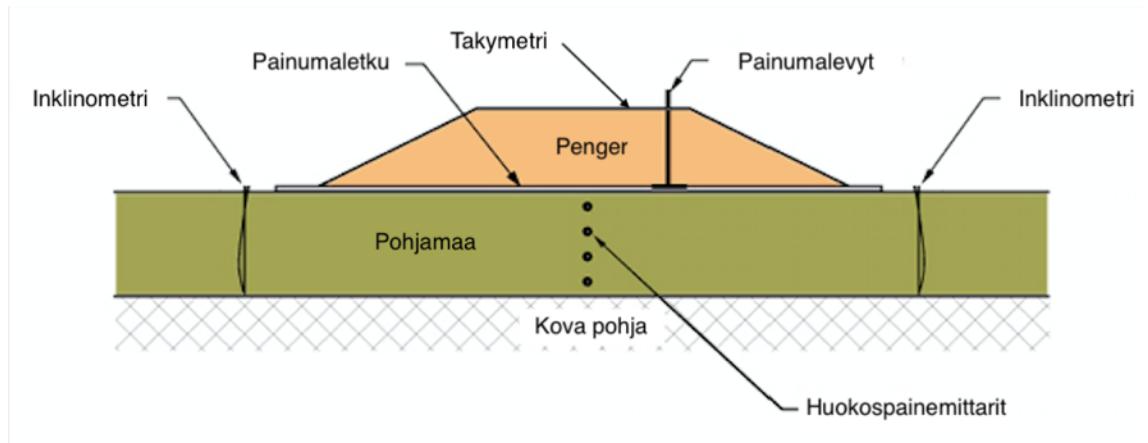
Geoteknisiä siirtymämittausmenetelmiä ovat esimerkiksi painumaletku, inklinometri, pai-
numatangot sekä ekstensiometri. Rakenteen pohjalle vaakasuunnassa asennettavan
painumaletkun avulla voidaan mitata rakenteen painumista suhteessa ympäröivään poh-
jamaahan. Painumaletku soveltuu penkereiden alusrakenteen tai pohjamaan painumien

ja painumaprofiilin mittauksiin ja monitorointiin. Painumaletkua voidaan myös käyttää yli-pengerten aiheuttamien painumien tarkkailuun. Painuman mittaaminen perustuu letkuun tasaisesti sijoitettujen vedenpaineantureiden mittaustuloksiin, joiden perusteella letkun pisteen korkeusasema voidaan määrittää. (SGY 2017, s. 9) Painumien ollessa suuria painumaletku voi vaurioitua ja siten mittaus epäonnistua. Myös painumaletkun asennukseen ja 0-vaaitukseen liittyy virheen mahdollisuus, minkä takia painumaletkumittausten tarkkuus on 3–20 mm. (Liikennevirasto 2011, s. 11)

Maahan pystysuunnassa asennettavan inklinometriputken avulla voidaan mitata maakerrosten vaakasuuntaisia siirtymiä. Inklinometrin avulla voidaan muun muassa tunnistaa liukupintojen sijainti maarakenteissa ja tunnistaa sivusiirtymiä, jotka eivät välttämättä ole havaittavissa rakenteen pinnalla. Inklinometrimittauksen tarkkuus on 1–20 mm (SGY 2017, s. 6) Erittäin tarkkoja siirtymämittauksia suoritettaessa käytetään tyypillisesti ekstensiometrimittauksia. Ekstensiometrillä havaitaan erittäin pieniä liikkeitä kahden ankkuroidun sensorin etäisyyden perusteella. Mittausmenetelmä soveltuu erityisesti kallion liikkeiden mittauksiin halkeamissa ja rakovyöhykkeillä. Ekstensiometrin mittaustarkkuus on 0,01–3 mm, mutta toisaalta sillä voidaan mitata vain erittäin pieniä siirtymiä ankkureiden rajallisen mittaussvälän takia.

Painumatankoa käytettäessä maarakenteen pohjalle asetetaan painumalevy, johon kiinnitetään pystysuunnassa mittaustanko. Rakenteen pohjamaan pinnan muutos voidaan lukea mittaustangosta. Ongelmana on mittaustangon vaurioituminen pengerrustyön aikana. Painumalevyjä ja -tankoja käytettäessä mittaustarkkuus on parhaimmillaan 1 mm. (Liikennevirasto 2011, s. 8–9) Mittaustanko on mahdollista myös asentaa jälkeempään poraamalla se syvemmälle maaperään ja ruuvaamalla se kiinni määritettyyn maakerrokseen. Mittaustarkkuus on kairatangon ja siirtymäanturin avulla mitattaessa kairatangon asennussyvyydestä riippuen noin 1 mm. (Luomala 2010, s. 43)

Kuvassa 1 on havainnollistettu esiteltynä mittausmenetelmiä kuvitteellisessa pengerrakenteessa. Penkereen käyttötarkoitus asettaa vaatimuksia rakenteen ja pohjamaan siirtymien mittauksille. Esimerkiksi ratapenkereellä kuormat ovat suuria ja ratageometrian muutokset eivät saa ylittää tiukkoja raja-arvoja, joten rakenteen siirtymiä mitataan ja monitoroidaan tyypillisesti usealla eri menetelmällä. Toisaalta esimerkiksi meluvallipenkereellä kriittisintä on rakenteen vakavuus ja turvallisuus, mikä tulee ottaa huomioon myös rakenteen siirtymiä mitattaessa. Tällöin mittaustarkkuus voi olla karkeampi ja mittauksilla voidaan seurata esimerkiksi vain pohjamaan painumia.



Kuva 1: Maarakenteiden mittaus- ja monitorointimenetelmiä (ROADEX 2019, Turpeen päälle rakennetut tiet)

3. LASERKEILAUSS MITTAUSMENETELMÄNÄ

3.1 Taustaa

Laserteknologiaa on jo 1970-luvulta lähtien käytetty etäisyysmittauksiin ja kartoituksiin. Menetelmä perustuu lähetettävän lasersäteen heijastumiseen mitattavasta kohteesta ja heijastuneen säteen tulkitsemiseen ja siten etäisyyden määrittämiseen. Ensimmäisenä lasersäteiden käyttö mittaussmenetelmänä vakiintui prismattomissa takymetrimittauksissa. Optiseen tarkasteluun perustuvissa mittauksissa mittauspisteeseen tarvitaan prisma, joka heijastaa valonsäteen takaisin mittausslaitteelle. Tehokas lasersäde kuitenkin heijastuu ympäristön pinnoista soveltuviissa olosuhteissa, mikä mahdollistaa prismattoman mittauksen, joskin mittauksarkkuuden hieman kärsiessä. Laseretäisyysmittarit yleistyivät ensimmäisenä laajoissa ja vaikeasti tavoitettavissa mittausskohteissa, kuten kaivoksissa, tunneleissa ja louhoksilla, joissa prisman asettaminen mittauspisteeseen oli haastavaa tai jopa mahdotonta. (Petrie & Toth 2018, s. 1–2)

Laseretäisyysmittareiden nopeat pistemittaukset mahdollistivat tehokkaan mittausspisteiden sarjan määrittämisen ja sitä ryhdyttiin käyttämään esimerkiksi rinteiden ja penkereiden profiilimittauksissa ja kaltevuuden määrittämisessä. Mittaukset suoritetaan kohtisuorasti seinämää tai rinnettä kohti, soveltuvan tiheällä mittaussvälillä ja pystysuorasti rakenteen juurelta sen huipulle. Siten saadaan tuloksena rakenteen kaltevuus ja myös tietoa pinnan epätasaisuudesta. Profiilimittauksia on luonnollisesti kehitetty tehokkaammaksi ja kattavammaksi, mikä on johtanut laserkeilaimen syntyyn. (Petrie & Toth 2018, s. 5–6)

Laserkeilaimen toiminta vastaa täysin laseretäisyysmittauksen periaatetta, mutta mittauksia suoritetaan kohteesta riippuen jopa miljardeja ja ne tapahtuvat nykyaikaisilla robotikeilaimilla automaattisesti. Laserkeilaimen keilainosa liikuttaa lasersäteitä lähettävää tykkiä pysty- ja vaakasuunnassa, jolloin yhdellä mittauksella voidaan mitata kaikki ympäristön lineaarisessa näköyhteydellä olevat pintojen pisteet. Keilattavan alueen laajuutta ja mittausspisteiden tiheyttä voidaan säädellä mittausskohteeseen parhaiten soveltuvaksi. Useimmiten laserkeilaimen kuuluu sisäänrakennettuna myös optinen kamera, joka ottaa kuvia keilattavasta alueesta. Kuvat voidaan yhdistää keilaussaineistoon, jolloin mitatuille pisteille voidaan antaa väriarvo, mikä helpottaa erityisesti aineiston visuaalista käsittelyä. (Cronvall et al. 2012, s. 10–11)

Laserkeilaimen muodostamaa aineistoa kutsutaan tyypillisesti keilaussaineistoksi tai pistepilveksi.

3.2 Laserkeilaussovellukset

3.2.1 Maalaserkeilaus

Laserkeilaustekniikkaa varten on kehitetty useita sovelluksia, jotka palvelevat erilaisia tarpeita. Sovelluksien tarkkuus, käytettävyys, tehokkuus ja kustannukset vaihtelevat merkittävästi ja siten tarkoituksenmukainen sovellus on valittava keilauskohteen ja mittaustarpeiden perusteella. Maalaserkeilausta käytetään yleisesti rakennusalan laserkeilauksissa takymetrin kaltaisesti kolmijalan varasta. Keilausaineisto muodostetaan tietyistä kiinteistä pisteistä ja mikäli kohteesta halutaan kattavampi keilaus, tulee laitteisto siirtää toiseen paikkaan ja suorittaa uusi keilaus. Jos kohteesta halutaan muodostaa kolmiulotteinen malli, suoritetaan keilauksia käytännössä kaikilta kohteen pinnoilta, mikä vaatii tyypillisesti vähintään kolme keilauskertaa kohteen muodosta riippuen. Eri keilauksilla saadut aineistot kiinnitetään toisiinsa kiinteiden tähyksien ja takymetrimittausten avulla. Aineisto voidaan kiinnittää myös globaaliin koordinaatistoon. Maalaserkeilaimeilla tarkkuus on tyypillisesti erittäin tarkka, jopa alle 1 cm, ja keilaustiheys suurin. Keilausetaisyys voi lisäksi olla yhdestä metristä satoihin metreihin. (Cronwall et al. 2012, s. 16–17)

3.2.2 Ajoneuvolaserkeilaus

Ajoneuvoon asennettavaa laserkeilainta voidaan käyttää liikkeessä. Ajoneuvoon on tyypillisesti asennettu 2–4 laserkeilainta, jotka on kiinnitetty inertialaitteistoon, jolla pystytään eliminoimaan mittaustarkkuutta häiritsevät kallistuksen muutokset. Keilausten tarkkuuteen vaikuttaa kuitenkin merkittävästi ajoneuvon paikantaminen suhteessa muuhun ympäristöön, mikä tehdään tyypillisesti GPS-paikannuksen avulla. Ajoneuvokeilausta käytetään erityisesti tieväylien laserkeilauksessa ja tienpinnan painumien ja vaurioiden paikantamiseen. Ajoneuvokeilaus voidaan suorittaa myös maastokelpoisen ajoneuvon avulla, jolloin voidaan suorittaa keilauksia myös hankalammin saavutettavissa kohteissa. Ajoneuvokeilausten tarkkuus on noin 2–5 cm, mikä aiheutuu suurilta osin GPS-paikannuksen virheestä. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen kevyeen henkilöautoon asennettu laserkeilauslaitteisto. Korkealle sijoitetulla laserkeilaimella pyritään saamaan mahdollisimman kohtisuora keilaus ajoneuvoa ympäröivistä pinnoista.



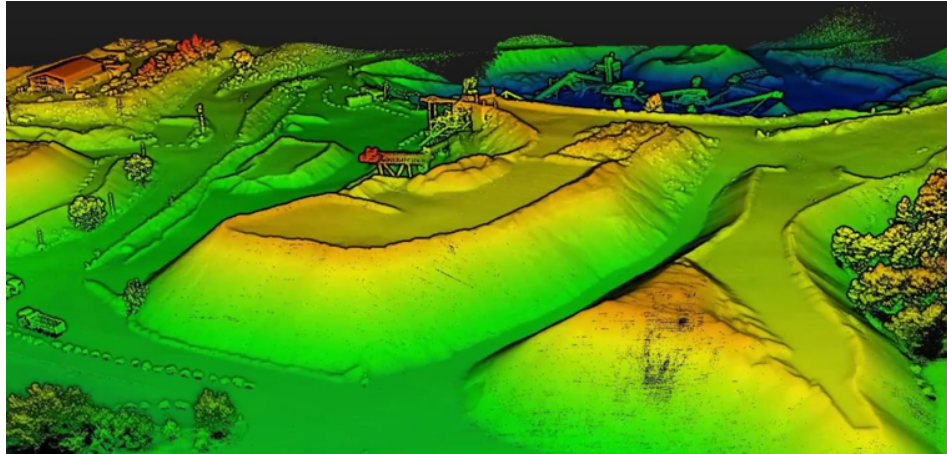
Kuva 2: Esimerkki ajoneuvolaserkeilaimesta (Teccon bvba 2019)

3.2.3 Lentolaserkeilaus

Lentokonelaserkeilausta on jo pitkään käytetty topografiamallien muodostamiseen ja muun muassa metsäteollisuuden tarpeisiin puiden korkeuden määrittämisessä. Lentokonelaserkeilauksen tarkkuus kärsii lentokorkeudesta aiheutuvan pitkän keilausetäisyyden takia ja se on parhaimmillaankin noin 10 cm. (Cronvall et al. 2012, s. 14) Lisäksi yksityiskohtaisten pinnanmuotojen keilaus on epätarkkaa ja kasvillisuuden ja metsien varjoalueet aiheuttavat epävarmuutta keilattuun aineistoon. Suurissa väylähankkeissa suunnittelun alkuvaiheissa käytetään laajalti lentokonekeilauksen avulla tuotettua maastomallia, jossa alueen topografiaa on kuvattu suurpiirteisesti. Aineistoa löytyy lähes koko Suomen alueelta jo valmiiksi, sillä laserkeilauslentoja on suoritettu viimeisten vuosikymmenten aikana kattavasti. Aineistossa yksittäisten keilauspisteiden etäisyys voi kuitenkin olla metrejä, jolloin maanpinnan tarkempia yksityiskohtia on vaikea havaita ja lisäksi harvasta keilausaineistosta on vaikea tunnistaa virheellisiä pisteitä.

Pienoiskopterisovellukset ovat kehittyneet viime vuosina merkittävästi. Monet laserkeilainvalmistajat ovat tarjonneet oman vaihtoehtonsa pienoiskopterikäyttöön. Pienoiskopterilla voidaan laserkeilata laajoja alueita nopeasti ja tehokkaasti. Lisäksi tarkkuus on matalan lentokorkeuden takia parempi kuin lentokonelaserkeilauksella. Suurin virhelähde liittyy GPS-yhteyden perusteella määritettävään kopterin sijaintiin. Pistepilven tark-

kuus on 1–2 cm, jonka lisäksi tarkkuuteen vaikuttaa suurimmillaan noin 5 cm virhe kop-
terin sijaintimäärityksessä (Strombee 2018). Kuvassa 3 on esitetty pienoiskopterilla kei-
lattua aineistoa kaivosalueelta, jossa korkeuseroja on havainnoitu värikorostuksella.



Kuva 3: Pienoiskopterilla laserkeilattu pistepilvimalli (YellowScan 2018)

3.3 Laserkeilausaineiston tarkkuus, luotettavuus ja käsittely

Heijastunutta sädettä voidaan tulkita kahdella eri tavalla: säteen jaksonajan tai vaihe-
eron perusteella. Vaihe-eroa käyttävät laserkeilaimet ovat hyvin nopeita, ja niillä on so-
veltuvaa keilata kokonaisia ympäristöjä tehokkaasti. Tarkkuus ja keilauksen maksii-
mietäisyys on kuitenkin jaksonaikaan perustuvilla menetelmillä parempi. Laserkeilainten
systemaattisen virheen merkittävin osuus liittyy keilausetaisyteen, joten keilattavan
kohteen ja keilauslaitteiston etäisyyttä vähentämällä pystytään vähentämään epätark-
kuuksia itse keilauslaitteen toiminnassa. Tässä tutkielmassa tarkasteltavissa maaraken-
teiden mittauksissa laserkeilauksen vähintään yhtä merkittävän virheen voidaan kuiten-
kin todeta liittyvän tyypillisesti keilauslaitteiston käytön epätarkkuuksiin ja virheisiin sekä
keilattavien kohteiden haastaviin olosuhteisiin ja maamateriaalien epätasaisuuksiin. Tyy-
pillisesti geodeettisten mittausten luotettavuus voidaan todeta suorittamalla vertailumit-
tauksia samoista pisteistä. Laserkeilauksessa yksittäisten keilauspisteiden vertailu on
käytännössä mahdotonta, sillä keilauslaitteistolla ei pystytä muodostamaan täsmälleen
vastaavaa pistepilveä uudelleen kohdistustähyksien käytöstä huolimatta.

Laserkeilaimen tallentamista mittauspisteistä muodostetaan koordinaatistoon kiinnitetty
laserkeilausaineisto eli pistepilvi. Se on kolmiulotteinen verkosto, jossa jokaisella mit-
tauspisteellä on koordinaattiarvo ja siten se voidaan tarkasteluohjelmistossa esittää ver-

koston pisteenä antamalla sille visuaalinen symboli, kuten piste. Laserkeilain tuottaa tyypillisesti LAS-muotoista aineistoa, joka sisältää jokaiselle mittauspisteille, sen koordinaattiarvojen lisäksi myös pistekohtaisen tunnistenumerosarjan, heijastuvan säteen intensiteetin, heijastumisajan, heijastuvien säteiden määrän tietylle pulssille sekä laserkeilaimen kulman heijastuvan säteen vastaanottohetkellä. (Graham 2018) Lisäksi keilausaineiston sisäisten pistesarjojen ominaisuuksiksi voidaan manuaalisesti nimetä keilattavan pinnan luokka, kuten rakennus, penger, putkilinja tai nurmialue.

Laserkeilausaineiston käsittelyssä ongelmana on yksittäisten mittauspisteiden muuttaminen helpommin käsiteltävään muotoon, kuten tasoiksi ja kolmiulotteisiksi muodoiksi. Kuten aiemmin mainittiin, ympäristön pintojen mittauspisteitä on suuri määrä ja käsittelemättömässä aineistossa ne vastaavat todellista pintaa tietyn hajonnan mukaan. Mittauspisteiden hajonnan takia aineiston tulkinnessa on haastavaa käyttää paikkatietoaineiston käsittelylle tyypillistä kolmiointimenetelmää, jossa lähimpien mittauspisteiden välille muodostetaan tasoviiva ja siten pisteiden sarjasta muodostuu taso. (Habib & Van Rens 2018, s. 7–9). Jossain suunnitteluohjelmistoissa, kuten Tekla Civilissä, on sisäänrakennettuna pistepilviaineistoa käsittelevä työkalu, joka muodostaa pistepilviaineistosta kolmiomallin (Jaakkola 2018, s. 21–22). Sen sijaan aineiston käsittelyyn ja pintojen muodostamiseen on kehitetty ja lisääntyvässä määrin käytetty laskennallisia menetelmiä, kuten tangentialtasomenetelmää ja rekonstruointia (Raumonen et al. 2015). Rakennetussa ympäristössä pinnanmuodot ovat tyypillisesti tasoja, kuutioita, särmiöitä, lieriöitä, kartioita tai palloja. Epäsäännöllisempien muotojen, kuten maan pinnan tai kasvillisuuden sovittaminen tiettyyn muotoon on usein hankalaa tai jopa mahdotonta. Tästä johtuen pistepilviaineiston käyttö ja soveltaminen on edennyt talonrakennuksen käyttökohteissa infrarakentamista nopeammin ja sujuvammin. Maarakenteiden mallintaminen pistepilviaineistosta vaatii aina jonkinlaista arviointia pinnan muodoista ja tätä vaikeuttaa keilausaineiston hajontapisteet ja raaka-aineiston käsittelyn tarve.

4. LASERKEILAUSKOE

4.1 Kokeen tavoitteet

Kokeessa pyritään toteuttamaan työmaan olosuhteita ja käytäntöjä vastaava laserkeilaus, jossa havaittaisiin muun muassa mitattavan kohteen olosuhteiden, laitteiston asennuksen, kalibroinnin ja käytön sekä mittausaineiston käsittelyn vaikutuksia laserkeilausmittauksen luotettavuuteen ja sovellettavuuteen. Pää tavoitteena on tarkastella laserkeilausmittauksen soveltuvuutta mittauskohteen maaperän mahdollisten siirtymien toteamiseen ja mittaamiseen. Riittävä mittaustarkkuus ja sen määrittäminen on tärkeä osa rakenteiden mittauskäytäntöä ja laserkeilauksessa ongelmana on, että laitevalmistajat ilmoittavat yksittäisten pisteiden virhemarginaalit, mutta mittausaineiston virheen ja sitä kautta mittaustarkkuuden määrittäminen on haasteellista. Kokeen tavoitteena on toteuttaa mittausmenettely, jossa keilausmittauksen tarkkuutta voidaan tarkastella yksittäisen keilauskerroksen sisällä ja toisaalta eri keilauskertojen välillä. Myös keilausmittauksen luotettavuutta pyritään tarkastelemaan, kuten esimerkiksi tunnistamaan kohteen olosuhteiden aiheuttamia aukkoja aineistossa.

Kokeen tavoitteena on myös havaita laserkeilausmenetelmän ongelmakohtia, jotka saattaisivat estää laserkeilausmittauksen käytön ja sen yleistymisen maarakenteiden mittauksissa. Laserkeilauslaitteiston käytön tulisi olla esimerkiksi mittaushenkilöstön suhteellisen helpposti omaksuttavissa, jotta menetelmä voisi kehittyä alan toimijoiden yleiseksi käytännöksi. Lähtökohtaisesti laserkeilausmittauksen käyttö vastaa monelta osin nykyaikaisen robotitakymetrin käyttöä, mutta erityisesti keilaustoiminto eroaa takymetrin mittausmenetelmästä. Käytännön eroavaisuutta tulisi tarkastella keilauskokeessa. Myös mittausaineiston käsittely vaikuttaa mittausmenetelmän käyttöön. Laserkeilausaineistosta on vaikea mittaushetkellä saada rakenteiden siirtymien mittauksen kannalta hyödyllistä tietoa ja kokeen tavoitteena onkin tutkia, miten laserkeilausaineistosta voidaan "irrottaa" siirtymien määrittämisen kannalta merkittävää mittausdataa. Käsittelyohjelmistojen välinen ominaisuuksien tai käytettävyyden tarkastelu jätettiin kokeen ulkopuolelle.

4.2 Kokeen toteutus

Kohdealueeksi valittiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen lähialueelta löytyvä rinnealue, josta löytyy erilaisia pintoja, kuten betonia, puustoa, kuivaa ja märkää maanpintaa, nurmea, vesilammikoita ja lumikasoja. Alueen valinnalla onnistuttiin tarkastele-

maan pienen keilausalueen sisällä ja yhdellä mittauskerralla eri tavoin heijastavia ja pinnanmuodoiltaan erilaisia pintoja. Lisäksi tasaisilta betonipinnoilta olisi soveltuvaa tarkastella keilauspisteiden hajontaa ja sama taso pyrittiin keilaamaan kahdesti, jotta keilauskertojen välillä pystyttäisiin tekemään vertailua.

Laserkeilain oli malliltaan Trimble SX10. Kyseessä oleva laserkeilain on toimintaperiaatteeltaan ja -tyypiltään nykyaikainen säteen jaksonajan määrittämiseen perustuvaa laserkeilain. Laitteiston keilaustarkkuus muodostuu laitevalmistaja Trimble Inc:n (2017) mukaan mittauspisteen 2,55 mm normaalivirheestä 100 metrin etäisyydellä, keilauksen 1,5 mgon kulmavirheestä sekä noin 2 mm etäisyyshajonnasta. Laserkeilaustoiminnon lisäksi laitteessa on myös valokuvakamera sisäänrakennettuna. Kuvassa 4 esitetyllä mittauslaitteistolla on myös mahdollista mitata takymetritoiminnon avulla yksittäisten pisteiden sijaintia prisman avulla tai ilman sitä.



Kuva 4: Keilauslaitteisto kolmannessa keilauspisteessä

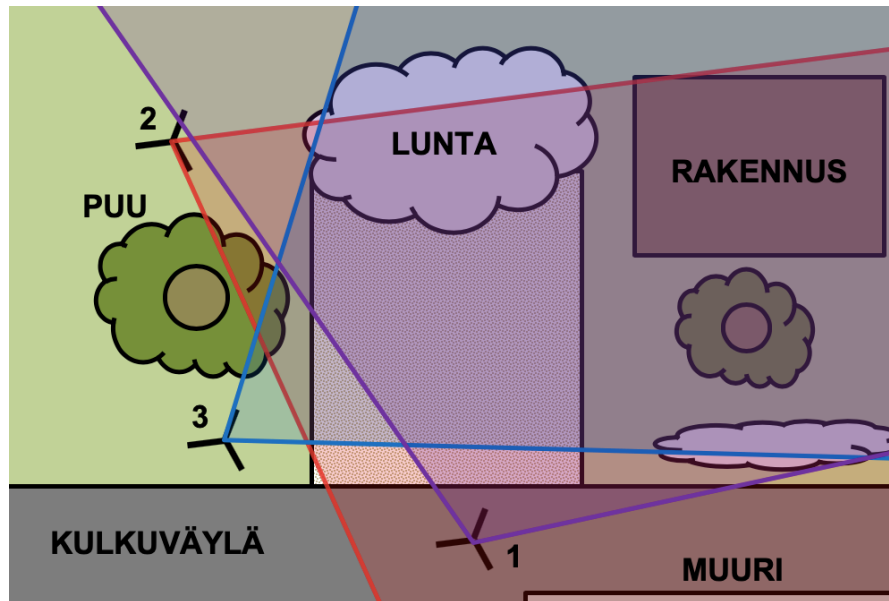
Keilain käytti kiintopisteinä maastoon keilausalueen ympärille asetettuja prismoja, joita oli yhteensä neljä kappaletta. Koordinaatistona käytettiin alueelle luotua sisäistä koordinaatistoa, jonka pohjoinen oli asetettu mielivaltaisesti, mutta z-akseli oli pystysuunnassa ja xy-taso edusti vaakapintaa. Koordinaatisto luotiin ensimmäisen keilauspisteen perusteella ja prismat kiinnitettiin koordinaatistoon sen avulla. Toinen keilauspiste kiinnitettiin

luotuun koordinaatistoon kaikkien neljän prisman avulla ja kolmannessa keilauspisteessä kolmen prisman avulla. Yksi prismoista on esitetty kuvassa 5.



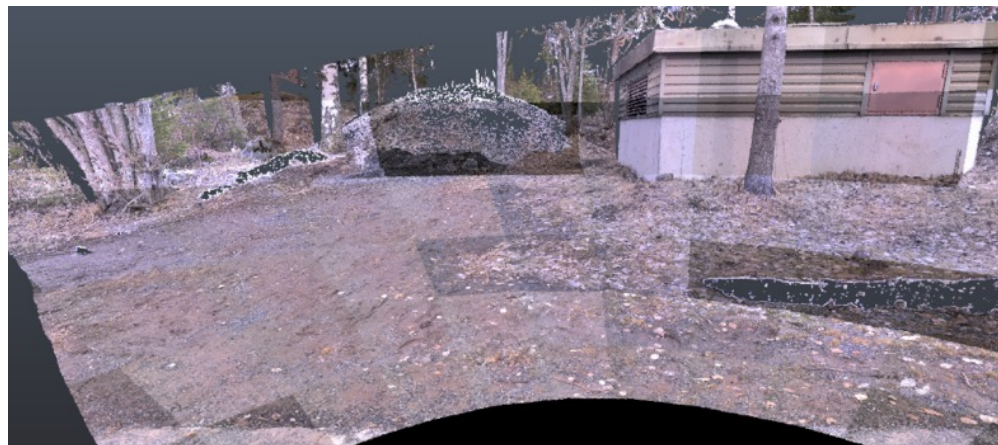
Kuva 5: Prisma keilaimen sijainnin määrittämistä varten

Kuvassa 6 havainnollistettu alue laserkeilattiin kolmesta eri pisteestä. Mittausaineiston rajaamiseksi keilattavat sektorit rajattiin tarkasteltavalle alueelle, vaikka keilauslaitteistolla olisi ollut mahdollista keilata kaikkialta sen ympäriltä. Tässä tapauksessa sektoreiden rajaaminen oli kuitenkin aineiston käsittelyn ja keilauksen nopeuden kannalta soveltuva, sillä keilausaika on suoraan verrannollinen keilauksen sektorikulmasta. Keilattava pinta-ala ei vaikuta keilauksen kestoon tai keilausaineiston kokoon, sillä mittauspisteiden määrä riippuu ainoastaan lähetettävien säteiden tiheydestä. Tyypillisesti keilauslaitteiston keilauspistetiheyttä voidaan säädellä ja tässä kokeessa käytettiin kohtalaista tiheyttä, jossa pisteiden väli on noin 25 mm, kun etäisyys keilaimesta on 50 metriä.



Kuva 6: Havainnekuva keilauspisteistä ja -sektoreista

Keilauskokeessa mittausten perusteella muodostettu pistepilviaineisto tallentui laserkeilaimen yhdistettyyn tietokonetablettiin, josta aineisto siirrettiin edelleen käsiteltäväksi laitevalmistajan omaan pistepilviaineiston käsittelyohjelmaan. Aineistosta luotiin kaksi tallenneversiota. Ensimmäisessä versiossa kolme eri keilauskertaa olivat erillisinä mitausaineistoina ja käsiteltävissä erikseen. Toisessa ne olivat yhdistettynä yhdeksi keilausaineistoksi. Kuvassa 7 on esitettyä ensimmäisen keilauspisteen aineisto mittauspisteestä kuvattuna. Aineistossa näkyy keilaussektorin raja, joitakin keilauksen aukkoja sekä valokuvauskertojen väliset sävyerot, jotka johtuvat erilaisista valotusasetuksista. Keilaimen alla on 30 asteen katvealue, jota ei ole fyysisten rajoitteiden vuoksi keilata (Trimble Inc. 2017).



Kuva 7: Ensimmäisen keilauskerran aineisto

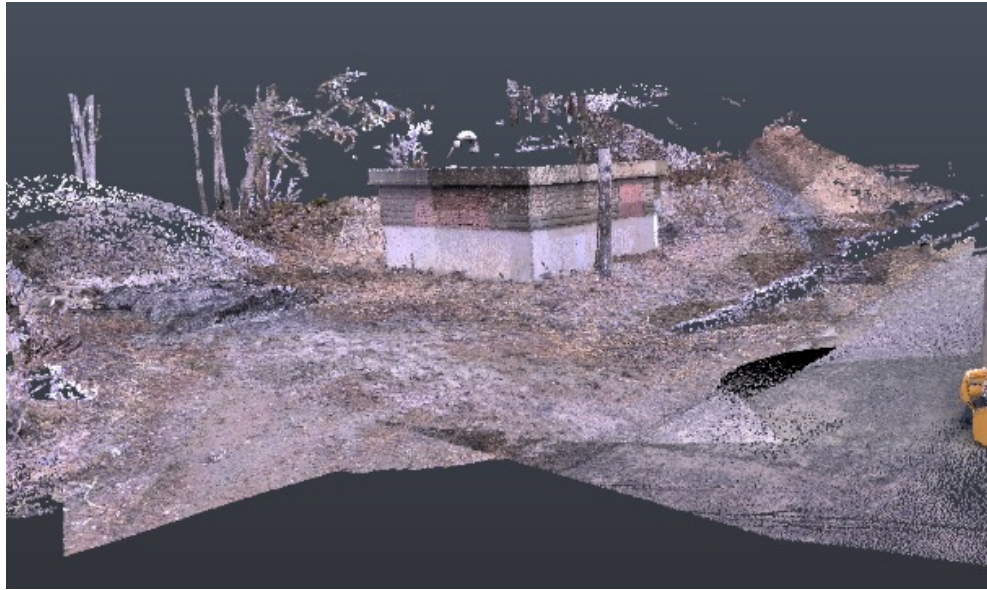
Valmisteltuja aineistoja käsiteltiin ja tarkasteltiin Autodesk ReCap –ohjelmalla, jossa on mahdollista tarkastella aineistoa visuaalisesti eri kuvakulmista, rajata aineistosta pienempiä osa-alueita tarkempaan tarkasteluun ja lisäksi mitata mitattujen keilauspisteiden etäisyyksiä toisiinsa verrattuna. Etäisyystarkastelu oli tehokkainta kolmiulotteisen koordinaatiston akseleiden suunnissa ja se myös tuotti todellista tietoa etäisyyseroista, sillä koordinaatiston akselit oli määritetty melko tarkasti keilatun alueen pintojen suhteen kohtisuoraksi.

4.3 Kokeen tulokset

Ennako-odotusten mukaisesti keilaimen käyttö ja kohdistaminen vastasi monelta osin robottitakymetrin käyttöä. Kohdistus suoritettiin prismojen avulla ja laitteiston käyttö onnistui ohjaintabletin avulla. Käyttöjärjestelmä oli selkeä ja esimerkiksi keilauskokeen oman koordinaatiston luominen onnistui sujuvasti. Yksittäinen keilaus kesti noin 10 minuuttia ja siihen kuului valitun sektorin keilaamisen lisäksi valokuvien ottaminen, jotta aineiston pisteille voitiin antaa havainnollisuutta parantava väriarvo. Keilaimen asettamiseen, kohdistamiseen ja valmisteluun kului paikasta riippuen noin 15 minuuttia, joten koko keilauskokeen ja kolmen keilauskerran kesto oli noin 1,5 tuntia. Laitteistoa säännöllisesti käyttävälle vastaavan alueen kolmen pisteen keilaus onnistuisi arvion mukaan alle tunnissa.

Kokeessa tarkkaavaisuutta ja huolellisuutta vaati keilauspisteiden sijainnin ja suuntien määrittäminen, prismojen asettaminen ja keilaimen tukevan alustan varmistaminen. Pehmeällä maa-alustalla tukeva kolmijalkakaan ei takaa keilaimen vakautta. Sisäänrakennetun virhemäärityksen perusteella keilauskertojen välille syntyi keilauspisteen kohdistamisesta noin 15 millimetrin absoluuttinen sijaintivirhe. Kohdistusprismojen riittävä määrä ja sijoittelu osoittautui tärkeäksi keilauksen lopputuloksen tarkkuuden kannalta. Toisaalta tyypillisesti työmaaolosuhteissa kiinteitä prismoja on käytössä myös takymetrimittauksia varten. Tässä kokeessa keilauskertojen välinen kohdistaminen aiheutti virheen yhdistetyn keilausaineiston tarkasteluun mutta se pystyttiin sulkemaan pois tarkastelemalla soveltuvissa kohdin vain yksittäisten keilauskertojen aineistoa.

Keilausaineistoa tarkasteltiin kahdella eri tasolla: aineiston kattavuuden ja luotettavuuden, sekä tasojen ja yksittäisten pisteiden hajonnan näkökulmasta. Yhdistetty aineisto on esitetty kuvassa 8. Käsittelyohjelmassa mittauspisteille annetaan väriarvo ja tietty vahvuus, jolloin ne kuvataan pisteiden sarjana. Kauempaa tarkasteltuna aineisto näyttää tasolta, kun todellisuudessa se koostuu yksittäisistä mittauspisteistä.



Kuva 8: Kokonaiskuva keilausaineistosta

Kirjallisuusselvityksen perusteella tiedettiin, että keilaussäteiden heijastumiseen vaikuttaa keilattavan pinnan materiaali, väri ja koostumus. Esimerkiksi vesi, lumi ja märkä maanpinta tiedettiin haastavaksi keilauskohteeksi. Keilausalueella oli lumen peittämää aluetta kasana ja alueen reunalla valumaojan pohjalla. Lumen heijastuvuus on liian suuri laserkeilaimen toimintaperiaatteen kannalta, eikä siitä siten saatu luotettavasti mittauspisteitä. Myöskään vesilammikosta ei odotetusti saatu mittaustuloksia. Lumikasan epäpuhtauksista ja sorasta mittauspisteitä saatiin jossain määrin ja siten aineistossa ei ollut kokonaista aukkoa. Kuvassa 9 on vertailtu keilausaineistoa ja todellista tilannetta kuvaavaa valokuvaa. Toinen keilausaineiston luotettavuutta vaikeuttava tekijä oli sorakasojen epätasaisuus, minkä takia keilaussäteet eivät ole ulottuneet pinnan syvänteisiin ja keilausaineistossa havaittiin aukkoja.



Kuva 9: Lumikasa keilausaineistossa ja vertailuna valokuvassa

Märältä maanpinnalta sen sijaan onnistuttiin saamaan keilauspisteitä täysin normaalisti. Maanpinta oli erittäin märkä, mutta esimerkiksi vesilammikoita ei alueella ollut. Näiden osalta tarkastelua ei siten voitu tehdä. Lähtökohtaisesti vedenpinnalta ei minkäänlaisia keilauspisteitä ole mahdollista saada. Kuvassa 10 on esitetty maanpinta pistepilviaineistossa ja valokuvana, josta näkyy maanpinnan todellinen kosteus.



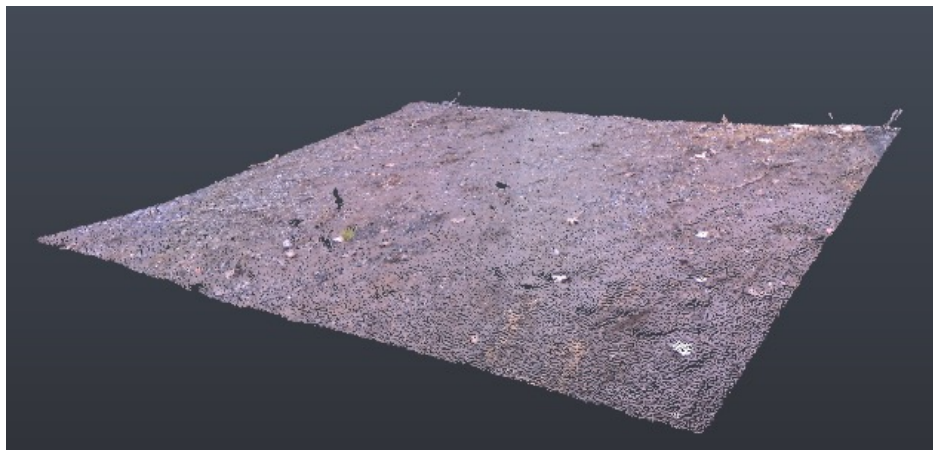
Kuva 10: Märkä maanpinta keilausaineistossa ja vertailuna valokuvassa

Yksittäisten keilausten pistepilviin syntyi objektien taakse kuvassa 11 näkyviä katvealueita, ns. varjoja. Jotkin alueet olivat kahdella keilauskerralla katveessa mutta kolmannella ne pystyttiin keilaamaan. Tässä korostui keilausten määrän ja keilauspisteiden sijainnin suunnittelun merkitys. Kyseisiin katvealueisiin hukkuisi moniulotteisemmalla keilauskohteella paljon tietoa, mikäli keilauksen suunnittelu olisi riittämätöntä. Tässä tapauksessa merkittävimmät katvealueet pystyttiin keilaamaan vähintään toisella keilauskerralla. Esimerkiksi maa-alueen keskiosa osui keilattavaan alueeseen jokaisella keilauskerralla, jolloin kertojen välisiä eroja voitiin vertailla luotettavasti.



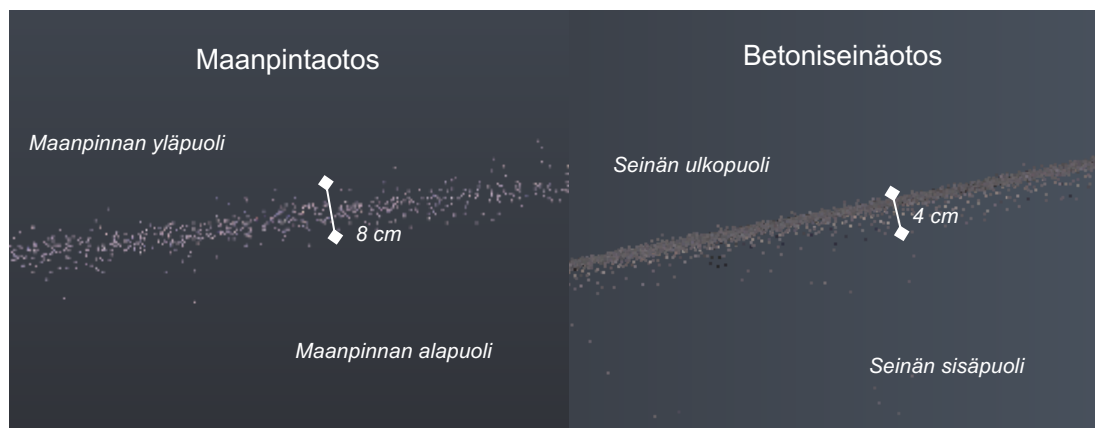
Kuva 11: "Varjo" keilauskertojen välillä

Pistepilven käsittelyohjelmistossa on mahdollista irrottaa aineistosta rajattuja osia. Rajauksen avulla tiettyjä alueita, materiaaleja ja pintoja voitiin tarkastella erillään. Tämän tutkielman tavoitteen kannalta kiinnostavin alue oli maamateriaalista koostuva maanpinta keilausalueen keskellä. Kuvassa 12 on esitelty noin neliömetrin kokoinen alue maanpinnalta keilatusta alueesta. Maapinta oli kohtalaisen tasainen ja koostui hienorakeisesta maasta lukuun ottamatta yksittäisiä karkeita rakeita ja epätasaisuuksia maanpinnalla. Kyseinen maa kuitenkin vastasi monelta osin tyypillistä maarakenteiden materiaalia. Kun otospintaa tarkastellaan kohtisuorasti, voidaan määrittää maanpinnan keilaukselle pistetiheys, joka on tarkastelualueella keskimääräisesti noin 3 pistettä neliösentiä kohden. Pistetiheys vaihtelee pinnanmuotojen mukaisesti, sillä keilaus suoritettiin viistosti pintaa kohti. Pisteiden määrästä voidaan todeta, että yksittäisten pisteiden tarkastelu ja käsittely ei ole tarkoituksenmukaista, kun pisteiden määrä ja tiheys on näin suuri ja ongelmallisuus korostuu maanpinnan epätasaisuuksien takia.



Kuva 12: Otos maanpinnasta yhdeltä keilauskerralta

Kuvassa 13 on esitetty poikkileikkaukset esitetystä maanpintaotoksesta ja vertailukoh-
tana keilausalueella sijainneen huoltorakennuksen betoniseinästä. Maanpintaotoksen
pinta-ala on pienempi kuin betoniseinäotoksen, minkä takia yksittäiset pisteet näkyvät
maanpintaotoksen poikkileikkauksessa selkeämmin. Betoniseinäotokseen valittiin suu-
rempi ala, jotta pisteiden kokonaishajonta erottuisi selkeämmin poikkileikkauksesta.
Maanpinnan poikkileikkauksessa voidaan todeta olevan tasaisesti hajontaa molempiin
suuntiin, kun taas betoniseinän poikkileikkauksessa virhepisteiksi todistettavaa hajontaa
on vain seinän sisäpuolella. Betoniseinän tasainen pinta ja yksiselitteinen taso helpotta-
vat aineiston käsittelyä ja tasopinnan sovittamista poikkileikkauksen tasaiselle pinnalle,
jonka voidaan todellisuudessa todeta vastaavan betoniseinän pintaa kohtuullisella tark-
kuudella. Betoniseinän sisäpuolelle ulottuvat virhepisteet johtuvat todennäköisesti beto-
nipinnasta virheellisesti heijastuneista ja kimmonneista säteistä, jotka siten tulkitaan liian
kaukaisiksi.



Kuva 13: Maanpintaotoksen ja betoniseinäotoksen poikkileikkausten vertailua

4.4 Tulosten yhteenveto

Edellä esitettyjä poikkileikkauksia tarkasteltaessa voidaan todeta, että maanpintaotok-
sen tulkinnassa ja jälkikäsittelyssä on merkittävä riski pinnan virheelliselle määrittämiselle.
Kirjallisuudessa arvioituja virheitä ei voida suoraan soveltaa käytännön mittauksiin, sillä
aineistossa ilmenee monta virhemahdollisuutta keilausten suorittamisesta aineiston kä-
sittelyyn, mikä saattaa mahdollistaa virheen kertaantumisen eri vaiheissa. Keilausten
luotettavuus paranee merkittävästi selkeillä ja tasaisilla pinnoilla. Luotettavamman kei-
lauksen lisäksi myös aineiston käsittely ja pinnan muodostaminen aineistosta voidaan
tehdä ilman merkittäviä tarkkuusmenetyksiä.

Betoniseinäotoksesta keilaus voidaan suorittaa mittauskokeen perusteella alle 3 cm tarkkuudella ja lisäksi aineiston pinnanmääritys voidaan tehdä mahdollisesti keilausaineiston hajontaa tarkemmin jopa noin 1 cm tarkkuudella. Sama päätelmä on todennäköisesti yleistettävissä maalatuille tai muuten heijastamattomille teräspinnoille ja muille tasaisille pinnoille lukuun ottamatta lasia tai muita läpinäkyviä pintoja. Tasaisen ja karkean pinnan välimuodoilla, kuten asfaltilla aineiston hajonta todennäköisesti kasvaa mutta pinnan suhteellisen tasaisuuden vuoksi tason määritys on oletettavasti luotettavampaa kuin maanpinnoilla. Aineiston tarkastelun perusteella voidaan lisäksi todeta, että laserkeilain harvoin tulkitsee yksiselitteisestä pinnasta heijastuvat säteet todellisuutta lähemmäs, sillä niiden ei ole mahdollista heijastua ennen todellista pintaa.

Maanpinnan tapauksessa epätasaiset muodot ja olosuhteet vaikuttavat kattavan keilausaineiston tuottamista. Vesistöalueilla ja talviolosuhteissa lumisilla pinnoilla keilausta ei voida suorittaa ja lisäksi maarakenteiden vaihtelevat muodot vaikeuttavat keilausten suorittamista tai vähintään vaativat tarkkaa keilauksen suunnittelua tai esimerkiksi pienolaserkeilaimen käyttöä. Tällöin mittaustarkkuus ei kuitenkaan ole samalla tasolla kuin maalaserkeilauksessa. Yksittäisissä keilauksissa maanpinnan pisteissä havaittiin merkittävää noin 5 cm hajontaa ja lisäksi hajontaan vaikutti myös maanpinnan epätasaisuus. Tarkastelussa oli haastavaa tunnistaa keilauksen hajonta maanpinnan epätasaisuuksista, mikä on merkittävä ongelma maanpinnan keilauksen tarkkuuden määrittämisessä. Aineiston käsittelyssä suoran tasopinnan sovittaminen maanpinnalle on haastavaa ilman merkittävien epätarkkuuksien aiheuttamista. Kokeen perusteella voidaan myös todeta, että karkeilla murskemateriaaleilla hajonta on todennäköisesti vielä suurempi, sillä koealueen maanpinnan materiaali oli suhteellisen hienorakeista.

Taulukossa 1 on esitetty keilauskokeen tuloksien yhteenvetona laserkeilauksen luotettavuutta ja tarkkuutta erilaisille pinnoille ja materiaaleille. Keilauksen aukkokohtat vaikuttavat keilausaineiston luotettavuuteen, mikä edelleen vaikuttaa tulosten luotettavuuteen ja mahdollisten johtopäätösten tekemiseen esimerkiksi maarakenteen vahvistamisen kannalta. Keilauksen hajonnalla tarkoitetaan poikkileikkauksista tarkasteltua keilauspisteiden hajontaa. Tässä kokeessa tuloksia voitiin tarkastella betonipinnan ja hienorakeisen maamateriaalipinnan tapauksissa. Päätelmien perusteella voitiin tehdä myös arvio, että karkearakeisen maamateriaalin hajonta on vähintään yhtä suuri kuin tasaisemalla, hienorakeisella pinnalla. Betonimateriaalin tapauksessa aineiston käsittelyllä voidaan pinta määrittää keilauspisteiden hajontaa tarkemmaksi, sillä pinta voidaan tulkita laserkeilaimen toimintaperiaatteen mukaisesti tiettyyn kohtaan hajontaspektrillä. Maamateriaalilla aineiston käsittelyssä joudutaan tekemään erityisesti epätasaisilla pinnoilla arvio pinnan todellisesta sijainnista. Lisäksi keilauspisteiden hajonnasta on haastavaa

tulkita tietty pinta, jolle todellinen maamateriaalin pinta sijoittuu. Tästä johtuen maamateriaaleilla tarkkuus on käsittelyn jälkeen suurempi kuin itse keilauksen hajonta. Lisäksi voidaan todeta, että kaikilla keilattavilla pinnoilla luotettavuuteen vaikuttaa myös käyttäjän virheet, eli ongelmat ja epätarkkuudet keilauslaitteiston käytössä.

Taulukko 1: Laserkeilauksen luotettavuuden ja tarkkuuden vertailua eri materiaaleilla ja pinnoilla

	Tasainen pinta (betoni, teräs, asfaltti)	Hieno maa- materiaali	Karkea maa- materiaali	Lumi, jää, vedenpinta
Keilauksen aukkokohdat	Näkemäesteet ja ”varjot”	Pinnan epätasaisuudet	Pinnan epätasaisuudet ja maarakeiden raot	Keilaus ei mahdollista
Keilauksen hajonta	~ 3 cm	~ 5 cm	> 5 cm	-
Tarkkuus käsittelyn jälkeen	jopa 1 cm	~ 5 cm	> 5 cm	-

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Laserkeilaimella suoritettujen mittausten suurin etu on mittaus-, eli keilauspisteiden valtava määrä. Monet muut mittausmenetelmät rajoittuvat tiettyihin mittauspisteisiin, jolloin kyseisten pisteiden ulkopuolella tapahtuvat muutokset ja siirtymät saattavat jäädä mittausaineiston ulkopuolelle. Laserkeilauksella voidaan määrittää kaikkien näkyvissä olevien pintojen sijainnit koordinaatistossa. Pinnoilta määritettyihin pisteisiin sisältyy paljon tietoa ja nykyteknologian mukaisilla laitteistoilla pisteitä saadaan myös tallennettua erittäin suuri määrä suhteellisen nopeasti. Erilaisiin mittauskohteisiin on saatavilla erilaisia sovelluksia ja esimerkiksi maarakenteiden mittauksessa voidaan käyttää kaikkia tässä tutkielmassa esitettyjä sovelluksia.

Kun verrataan laserkeilausta muihin mittaus- ja monitorointimenetelmiin, sen vahvuuksia ovat tehokkuus laajojen pinta-alojen ja vaikeasti saavutettavissa olevien kohteiden mittaus. Toisaalta heikkouksia ovat keilauskaluston kallis hankintahinta sekä aineiston käsittelyn hitaus ja vaivalloisuus. Tulevaisuudessa monitoroinnin hyödyntämisen voidaan olettaa kasvavan nykyisen trendin mukaisesti ja täten entistä tarkemman ja kattavamman tiedon merkitys kasvaa. Lisäksi monitoroinnin reaaliaikaisuus korostuu ja tarve kasvaa mittausmenetelmille, joilla jatkuva mittaaminen ja mahdollisimman tarkan datan hankkiminen on mahdollista. Laserkeilausaineiston käsittelytarpeen takia sitä ei nykyisillä käsittelyohjelmistoilla ja -käytännöillä voida pitää reaaliaikaisena mittausmenetelmänä. Laserkeilauslaitteisto on myös hankintahinnaltaan erittäin arvokas, joten sen sijoittaminen tiettyyn mittauspisteeseen jatkuvaan mittauskäyttöön aiheuttaa merkittäviä kustannuksia verrattuna muihin monitorointimenetelmiin. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että laserkeilauksella voidaan määrittää ainoastaan näkyviä pintoja ja siirtymiä, jolloin maan sisällä tapahtuvista muutoksista ja esimerkiksi maakerrosten siirtymistä ei saada tarkempaa tietoa. Tässä tapauksessa käyttökelpoisempia mittausmenetelmiä ovat esimerkiksi inklinometri- ja painumaletkumittaukset.

Maarakenteiden siirtymien mittauksilla pyritään saamaan kokonaisvaltainen kuva maarakenteen käyttäytymisestä. Laserkeilauksen avulla pystytään määrittämään rakenteen pinnan painumaprofiili ja siten selvittämään alueet, joilla painumia on tapahtunut eniten ja esimerkiksi rakenteen ympäristössä havaittavia muita deformaatiomuutoksia. Mittausten tarkkuus on oltava riittävä muutosten luotettavaan havainnointiin. Yksittäisen laserkeilatun mittauspisteen tarkkuus on esimerkiksi mittauskokeessa käytetyllä maalaserkeilaimella jopa 1 cm, jonka voidaan todeta riittävän kaikkiin maarakenteiden mittaustarpei-

siin. Laserkeilauksen kokonaisvirhe muodostuu kuitenkin monesta ja eri tekijästä ja pelkästään maarakenteiden pintojen epätasaisuus rajoittaa mahdollista saavutettavaa mitaustarkkuutta. Suoritetun mittauskokeen perusteella voidaan todeta, että maarakenteiden laserkeilauksen luotettavuuteen ja tarkkuuteen vaikuttaa suurella määrällä muun muassa keilattavan pinnan materiaali ja epätasaisuus, pinnan tulkinta pistepilviaineistosta sekä tuloksin luotettavuus.

Laserkeilaimen vahvuudet korostuvat mittausympäristön selkeästi havaittavia pintoja määritettäessä. Esimerkiksi päällystettyjen pintojen, tukimuurien siirtymien ja rataiskkon pinnan mittauksissa keilausten tarkkuus kasvaa ja vertailtavuus helpottuu merkittävästi mutta toisaalta kyseisillä rakenteilla myös mittauksien tarkkuusvaatimukset kasvavat merkittävästi. Tieväylien päällysteen kuntotarkastuksissa ajoneuvolaserkeilausta on käytetty jo laajalti ja ratarakentamisessa laserkeilausta on kehitetty radan ympäristön mallintamiseen ja esimerkiksi näkemätarkasteluun (Jaakkola 2018). Laserkeilausten luotettavuutta ja käytettävyyttä maarakenteiden mittauksiin vaihtelevissa ympäristöissä ja olosuhteissa tulisi selvittää jatkossa lisää. Voidaan kuitenkin todeta, että tarkkuusvaatimuksia ei voida määrittää suoraan eri laserkeilaussovellusten valmistajien ilmoittamien tarkkuuksien perusteella vaan tarkkuuteen vaikuttaa aina myös mittausympäristö ja jälkikäsittelyyn käytettävät resurssit ja aika. Tarkemmat mittaukset vaativat tarkempaa jälkikäsittelyä ja keilauspisteiden hajonnan tarkastelua. Lisäksi tulisi tutkia lisää laserkeilauksen monitorisovelluksia, joilla keilauksia voitaisiin tehdä tietyin aikavälein luotettavasti ja kattavasti. Tällöin rakenteen siirtymistä saataisiin jatkuvaa mittausaineistoa ja mitattujen pintojen vertailu saattaisi helpottua tiheämmän aineistomäärän avulla.

LÄHTEET

Bäcklund, J. (2013). Geotekninen monitorointi Suomessa. Aalto-yliopisto. Espoo. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30149/master_b%C3%A4cklund_jalle_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T. (2012). Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. Liikennevirasto. Helsinki. Saatavissa (viitattu 16.4.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf

Elberink, S.O., Hyypä, J., Jaakkola, A., Kaartinen, H., Kukko, A., Lehtomäki, M., Pu, S., Rutzinger, M., Vaaja, M. & Vosselman, G. (2013). Mobile Mapping – Road Environment Mapping using Mobile Laser Scanning, European Spatial Data Research, Official Publication, No. 62. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): http://www.eurosdrr.net/sites/default/files/uploaded_files/62_1.pdf

Graham, L. (2018). Data Management of Light Detection and Ranging. Teoksessa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim.) Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. 2. painos. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton. s. 269–294. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): https://books.google.fi/books?id=N_ErDwAAQBAJ&pg=SA9-PA20&lpg=SA9-PA20&dq=lewis+graham+Data+Management+of+Light+Detection+and+Ranging&source=bl&ots=W6mBy59oGS&sig=ACfU3U3OYmUF-gEmUJ2WxqXrccJ4huNLcDw&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiYwpKQilLiAhVmz-qYKHbFQDYQQ6AEwAnoECAgQAQ#v=onepage&q&f=false

Habib, A. & Van Rens, J. (2018). Accuracy, Quality Assurance, and Quality Control of LiDAR Data: Principles and Processing. Teoksessa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim.) Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. 2. painos. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton. s. 269–294. Saatavissa (viitattu 2.5.2019): https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/AKAM_LiDAR_Calibration.pdf

Jaakkola, M. (2018). Laserkeilauksella radan kunnossapidon lähtötietomalli – Liikenneviraston automaattisen tiedon tuotannon kokeilu. Liikennevirasto. Oulu. Saatavissa (viitattu 24.5.2019): https://vayla.fi/documents/20473/377281/Laskerkeilaus_l%C3%A4ht%C3%B6tietomalli_destia/103008c8-74b9-48fb-b47e-3545f8355ab8

Liikennevirasto. (2018). Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Liikennevirasto. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf

Liikennevirasto. (2014). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 17/2014. Liikennevirasto. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2014-17_rato3_web.pdf

Liikennevirasto. (2011). Siirtymä- ja huokospainemittausten sekä paalujen koekuormituksen mentelmäkuvaukset. Liikenneviraston ohjeita 6/2011. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.11.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2011-06_siirtyma_ja_huokospainemittausten_web.pdf

Liikennevirasto. (2010). Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu – Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Helsinki. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf3/lo_9-2010_tiepenkereiden_ja_leikkausten_suunnittelu.pdf

Luomala, H. (2010). Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Helsinki. Saatavissa (viitattu 20.5.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2010-22_ratapenkereiden_monitorointi_web.pdf

Teccon bvba. (2019). Marketing material: GIS Mapper. Palveluesittely. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://www.mobile-mapping.be/techniek/gis-mapper/>

Pekkala, J. (2015). 3D-laserkeilausaineiston hyödyntäminen inframallintamisen yhteydessä ja sen lopputuotteen laadun varmentaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23368/Pekkala.pdf?sequence=3>

Pelho, A. (2017). Raskaiden junien kuormitusvaikutusten monitorointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25865/Pelho.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Petrie, G. & Toth, C. K. (2018). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. Teoksessa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim.) Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. 2. painos. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton. s. 1–28. Saatavissa (viitattu 2.5.2019): https://www.researchgate.net/publication/230642410_Topographic_Laser_Ranging_and_Scanning_Principles_and_Processing

Pylkkänen, K. & Nurmikolu, A. (2015). Routa ja routiminen ratarakenteessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015. Liikennevirasto. Helsinki. Saatavissa (viitattu 10.12.2019): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-22_routa_routiminen_web.pdf

Raumonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Liski, J. & Repo, A. (2015). Laskennallinen menetelmä puun biomassan ja oksien kokojakauman määrittämiseen laserkeilausdatasta. Esitysaineisto. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://docplayer.fi/5720513-Laskennallinen-menetelma-puun-biomassan-ja-oksien-kokojakauman-maarittamiseen-laserkeilausdatasta.html>

ROADEX. (2019). ROADEX Network E-Learning–aineisto. Saatavissa (viitattu 23.11.2019): <https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/turpeen-paalle-rakennetut-tiet/9-seuranta-ja-dokumentointi/>

Stormbee. (2018). Technical Datasheet – UAV S20. Tuote-esittely. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://www.stormbee.com/wp-content/uploads/2018/09/final-EU.pdf>

Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY: Monitorointitoimikunta. (2017). Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet. Suomen Geoteknillinen Yhdistys – Finnish Geotechnical Society. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/geoteknisen_mittaamisen_ja_monitoroinnin_olennaiset_kasitteet_ja_periaatteet_6-11-2017_julkaisu.pdf

Tiehallinto. (2008). Tierakentamisen mittaussuunnitelman laatimisohje. Tiehallinto. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2000024-v-08tienrakent_mittaussuunn_laot.pdf

Trimble Inc. (2017). Datasheet: Trimble SX10 – Scanning Total Station. Tuote-esittely. Trimble Inc. Westminster. Saatavissa (viitattu 2.5.2019): <https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-03/Datasheet%20-%20SX10%20Scanning%20Total%20Station%20-%20English%20USL%20-%20Screen.pdf>

YellowScan. (2018). UAV LiDAR Pointclouds - Mining Application. Video Youtube-palvelussa. Saatavissa (viitattu 24.11.2019): <https://www.youtube.com/watch?v=x1WPXCc9FGg>

Ympäristöministeriö. (2018). Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakenteiden lujuus ja vakaus: Pohjarakenteiden suunnittelu. Ympäristöministeriö. Helsinki. Saatavissa (viitattu 23.4.2019): https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus